نشریهٔ مهندسی عمران (۶۸-۵۵)
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

DOI: 10.22067/jfcei.2022.73953.1096

بررسی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار*

مقاله پژوهشی

احسان نعیمی حامی صفار[۱] هاشم شریعتمدار[۲]

چکیده یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بار لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی شیاردار است. عملکرد این سیستم به گونه‌ای است که با ایجاد شیارهای عمودی در ورق دیوار برشی فولادی معمولی، این ورق به تعدادی نوار خمشی تبدیل می شود که با اعمال بار جانبی با تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک انرژی ورودی به سازه را مستهلک می‌کند. در این مجموعه سختی و مقاومت نهایی دیوار برشی فولادی به راحتی با تغییر مشخصات شیارها و ترکیب‌بندی آن‌ها قابل تنظیم است. رفتار شکل‌پذیر و توانایی استهلاک انرژی خوب از دیگر مزایای این نوع دیوار برشی فولادی است. حال چنانچه به جای شیارهای عمودی از شیارهای شیبدار (مایل) در ورق استفاده شود، عملکرد نوارها از حالت خمشی به محوری تغییر کرده و به طور مشابه با تحمل تغییرشکل‌های پلاستیک به عنوان یک میراگر غیرفعال عمل می‌کنند. در این مدل می‌توان با تغییر طول این اعضای محوری، تغییرمکان جاری شدن نوارها و سایر پارامترهای لرزه‌ای مجموعه را تغییر داد. هدف از این پژوهش ارزیابی عددی دیوار برشی فولادی شیاردار با شیارهای مایل و با ترکیب‌بندی شیار و سخت‌کننده‌ی انتهایی متفاوت است. برای این منظور پس از صحت سنجی مدل سازی در نرم‌افزار Abaqus، یک مطالعه پارامتریک بر روی دیوار فولادی با جایگذاری مختلف شیارها و سخت‌کننده‌های انتهایی متفاوت انجام می‌شود و رفتار آن تحت بار رفت و برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین رفتار این نمونه‌ها با یک نمونه‌ی بدون شیار مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج دیوار فولادی پیشنهادی با شیارهای شیبدار و دیوار فولادی بدون شیار با همان ابعاد نشان می‌دهد علی‌رغم کاهش مقاومت و سختی اولیه در نمونه شیاردار، این دیوار از رفتار چرخه‌ای مناسب‌تری برخوردار است و توانایی استهلاک انرژی بیشتری دارد و خصوصاً در دریفت‌های بالای ۲ درصد افت مقاومت کمتر و عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند تنها با تغییر در محل قرارگیری شیارها می‌توان مقاومت نهایی و سختی اولیه را به ترتیب تا ۱۹ و ۲۵ درصد تغییر داد. همچنین برای بالابردن میزان استهلاک انرژی استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی با ممان اینرسی بالاتر یکی از مؤثرترین راه‌هاست؛ به طوری که استفاده از مقطع Box ۱۰۰ به عنوان سخت‌کننده توانسته است استهلاک انرژی را نسبت به نمونه‌ی معیار بیش از ۲ برابر کند. در مجموع عملکرد دیوار برشی با شکل شیار پیشنهادی، مناسب ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی دیوار برشی فولادی شیاردار، مقاومت نهایی، منحنی چرخه‌ای، استهلاک انرژی.

مقدمه

یکی از اهداف مهم مهندسی عمران یافتن ابزاری نوین و کارآمد برای حفاظت سازه‌ها و تجهیزات درون آن‌ها در برابر نیروهای طبیعی می‌باشد. از طرفی زلزله یکی از رخدادهایی است که با وجود آن که تحقیقات فراوانی روی آن صورت گرفته، هنوز امکان پیش‌بینی دقیق زمان و مکان وقوع آن وجود ندارد. بنابراین به نظر می‌رسد تنها روش مقابله با آن ایمن‌سازی سازه‌هاست. در دهه‌های گذشته محققین بسیاری در سراسر دنیا برای ارائه روش‌های مناسب به منظور حفاظت از سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی تلاش کرده‌اند. در این میان سیستم دیوار برشی فولادی (Steel Plate Shear Wall) به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در سه دهه اخیر به سرعت در دنیا مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی شیاردار مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از ایجاد شیار در دیوار برشی فولادی، افزایش استهلاک انرژی و تمرکز خرابی در ورق فولادی و حفظ سایر اعضای حیاتی خصوصاً اعضای باربر ثقلی می‌باشد. به این ترتیب دیوار برشی فولادی عملکرد فیوز را در سازه انجام می‌دهد. یکی از ایرادات وارده به سیستم دیوار برشی فولادی، اعمال نیروهای بزرگ از طرف ورق فولادی به اعضای مرزی در اثر وقوع میدان کششی می‌باشد، که موجب بزرگ شدن مقاطع این اعضا می‌شود. از راه‌حل‌های این مشکل می‌توان استفاده از سوراخ‌های منظم، شیارهایی با اشکال متفاوت و بکارگیری فولاد با ظرفیت پایین‌تر برای ورق را نام برد [1].

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ می‌باشد.
(۱) دانشجوی دکتری عمران- سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
Email: shariatmadar@um.ac.ir

پژوهش‌های پیشین

در این بخش به تحقیقات انجام گرفته در زمینه دیوار برشی فولادی شیاردار و سیستم‌های مشابه پرداخته می‌شود. برای نخستین بار ایده‌ی استفاده از شیار در دیوار برشی توسط موتو [2] در سال ۱۹٦۸ ارائه شده است. این محقق دیوار برشی بتنی شیاردار را به عنوان سیستم مستهلک‌کننده انرژی معرفی نمود. این دیوار دارای شیارهایی با فواصل یکسان و در وسط ارتفاع دیوار است. شیارها با قطع کامل بتن و آرماتور ایجاد می‌شوند. موتو و همکاران [3] در سال ۱۹۷۳ در پژوهشی دیگر به بررسی رفتار دیوار برشی بتنی شیاردار پرداختند. آن‌ها منحنی بار- تغییرمکان را برای دیوار بتنی معمولی و دیوار بتنی شیاردار با انجام آزمایش‌هایی ترسیم نمودند. دیوار برشی معمولی، مقاومت بیشتری به دست آورد ولی در تغییرمکان نسبی کمتری گسیخته شد. مارتینز [4] در سال ۲۰۰۲ به بررسی رفتار دیوار بتنی شیاردار پرداخت. اگرچه دیوار شیاردار بتنی شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند ولی به علت کاهش مقاومت، تعداد دیوار مورد نیاز افزایش‌یافته درنتیجه وزن سازه بیشتر شده و نیروهای جانبی زلزله افزایش می‌یابند. علاوه بر آن بتن مسلح در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک چرخه‌ای به‌سرعت تخریب می‌شود. در ادامه این دو دلیل باعث عدم استفاده از شیار در دیوار برشی بتنی گردید. هیتاکا و ماتسوی [5] در سال ۲۰۰۳ بر روی دیوار برشی فولادی شیاردار با شیارهای عمودی مطالعاتی انجام دادند. مطالعات آن‌ها شامل ٤۲ آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف بود. پایه و اساس این طرح بر مبنای ایجاد تعدادی جزء خمشی برای تحمل تغییرشکل-های خمشی بزرگ می‌باشد. چهار سری نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها به بررسی اثر نسبت عرض به ضخامت، نسبت طول به عرض و تعداد ردیف رابطها (ترکیب‌بندی دیوار)، اثر روش‌های مختلف استفاده از سخت‌کننده برای کمانش خارج از صفحه و رفتار دیوار تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. اکثر نمونه‌ها بدون ایجاد ترک و زوال مقاومت تا تغییرمکان نسبی حدود ۳ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند. در نمونه‌ای که نسبت عرض به ضخامت آن برابر ده است، تا تغییرمکان نسبی ۲/۵ درصد کمانش خارج از صفحه رخ نداده است. بقیه نمونه‌ها در تغییرمکان نسبی‌های کمتر از ۲ درصد کمانش خارج از صفحه نموده‌اند. کورتس [6] در سال ۲۰۰۹ مطالعه بر روی پارامترهای مختلف در دیوار فولادی شیاردار تحت بار جانبی و ثقلی را انجام داد. نسبت ابعادی عرض به ارتفاع دیوارها ۱:۲ و ۱:٤ است. او متوجه شد که دیوار با نسبت عرض به ارتفاع ۱:٤ رفتار مناسبی را ندارد. دلیل آن تنش‌ها فشاری زیاد در ردیف آخر رابطها و عدم وقوع انحنا دوطرفه است. او با مطالعاتی که انجام داد، روابط مقاومت و سختی ارایه شده توسط هیتاکا و ماتسوی را اصلاح نمود. او توصیه کرد هرچه عرض رابطها کوچک‌تر باشد، رابطها پیوسته‌تر عمل کرده و سختی را افزایش می‌دهد. همچنین هرچه دیوار به وسط دهانه نزدیک‌تر باشد، تنش ناشی از نیروهای ثقلی کاهش می‌یابد. اترتون و همکاران [7] در سال ۲۰۰۸، از فیوز برشی در سیستم بادبند هشتی استفاده نمودند. در این سیستم، قاب مهاربندی‌شده به فنداسیون متصل نیست و توسط کابل‌های پیش‌تنیده متصل گردیده است. زمانی‌که قاب تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرد، دوران در فیوز برشی ایجاد می‌شود. فیوز برشی قبل از دست دادن مقاومت، تغییرمکان‌های نسبی بزرگی را تحمل کرده است. بعد از انجام آزمایش‌های مختلف، آن‌ها از شکل پروانه‌ای استفاده نمودند. ژاکوبسن و همکاران [8] در سال ۲۰۱۰ مطالعه عددی–آزمایشگاهی بر روی ترکیب‌بندی رابطها را انجام دادند. آن‌ها برای بررسی اثر طول رابطها و فاصله این رابطها از یکدیگر بر رفتار دیوار شیاردار، دو نمونه تحت عنوان نمونه‌های اصلاح‌شده مدل نموده و با نمونه معمولی (دارای رابطها با طول و فاصله ثابت) مقایسه کردند. رفتار نمونه با طول متفاوت رابطها، تفاوت چندانی با نمونه معمولی نداشته، درحالی‌که نمونه با فاصله متغیر رابطها، نسبت به نمونه معمولی رفتار مناسب‌تری از خود بروز می‌دهد. خاتمی‌راد و شریعتمدار [9] در سال ۲۰۱۷ با انجام یک پژوهش عددی–آزمایشگاهی به بررسی اثر شکل شیارهای عمودی و سخت‌کننده‌های انتهایی بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی پرداختند. آن‌ها با بررسی ۳ مدل با شکل شیار متفاوت و ۲ مدل با سخت‌کننده‌های انتهایی مختلف، تأثیر این تغییرات را بر پارامترهایی چون سختی اولیه، مقاومت، رفتار چرخه‌ای و کمانش خارج از صفحه ارزیابی کردند. ضمن آنکه با ارائه‌ی یک شکل نوین برای شیارهای عمودی، رابطه‌سازی روابط آن و انجام آزمایش، عملکرد دیوار برشی شیاردار را بررسی کردند. شکل شیار پیشنهادی موجب کاهش تمرکز تنش و گسترش ناحیه‌ی پلاستیک و در نتیجه افزایش اتلاف انرژی و همچنین استفاده از سخت‌کننده‌ی انتهایی باعث کاهش کمانش دیوار و افزایش

سختی اولیه آن شد. نظیفی و شریعتمدار [10] در سال ۲۰۱۸ اثر اندرکنش قاب و دیوار برشی فولادی شیاردار را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ممان اینرسی تیر سختی قاب و استهلاک انرژی مجموعه افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه با ۸ برابر شدن ممان اینرسی تیر سختی قاب حدود ۲۵ درصد افزایش می-یابد. همچنین آن‌ها برای سختی قاب رابطه‌ای ارائه کردند که نتایج مطلوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارد. جین و همکاران [1] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از یک ورق فولادی با شیارهای مورب و دو صفحه‌ی پیش‌ساخته‌ی بتنی در دو طرف آن (که نقش مهار جانبی را برای ورق ایفا می‌کنند) و انجام یک پژوهش عددی–آزمایشگاهی رفتار این سیستم را ارزیابی کردند. آن‌ها از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم کنترلی غیرفعال یاد کردند و بیان کردند که نوارهای فولادی بین شیارها مشابه اجزای خرپایی عمل کرده و با تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک رفت و برگشتی باعث اتلاف انرژی می‌شوند. برای تغییر سختی و مقاومت دیوار می‌توان تعداد و عرض نوارها را تغییر داد تا نیروهای اضافه به اعضای مرزی اعمال نشود. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که این سیستم قادر است بدون کاهش ظرفیت برشی دریفت ۲ درصدی را تحمل کند. وانگ و همکاران [11] نیز در سال ۲۰۱۷ با استفاده از دو ورق فولادی که دارای شیارهای مورب و مخالف جهت بودند و با یک حائل لاستیکی از یکدیگر جدا شده بودند، سعی در بهبود رفتار دیوار برشی فولادی کردند. آن‌ها با انجام یک پژوهش عددی رفتار این نوع دیوار فولادی را ارزیابی کردند. علت استفاده از دو ورق به طور همزمان ایجاد مهار جانبی توسط یکی از ورق‌ها که تحت بار جانبی در کشش است برای ورق مجاور (که در فشار است) و جلوگیری از کمانش آن عنوان شده است. ضمن آن‌که مکانیزم عملکردی دیوار فولادی از کشش و فشار همزمان به کشش و یا فشار تک‌محوری تغییر کرده است؛ این موضوع خود باعث جلوگیری از پارگی ورق که عموماً به علت خستگی در بارهای تکرارشونده رخ می‌دهد، می-شود. دیگر مزیت‌های این سیستم اتلاف انرژی بالا با جاری شدن نوارهای فولادی، انتقال بارهای کمتر به قاب، اطمینان از جاری شدن ورق پیش از اعضای مرزی و امکان تغییر مشخصات دیوار برشی با تغییر عرض و تعداد شیارها عنوان شده است. لو و همکاران [12,13] در سال ۲۰۱۸ با مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دیوار برشی شیاردار سعی در بهبود رفتار این دیوار کردند. این محققین در دو مقاله به صورت جداگانه به بررسی اثر شیارهای با طول نامساوی [12] و شیار با تعداد لایه-های متفاوت [13] تأثیر این دو عامل را بر رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی شیاردار ارزیابی نمودند. آن‌ها بنابر نتایج به دست آمده دیوار برشی شیاردار با شیارهای با طول نامساوی را به نسبت دیوارهای شیاردار معمولی دارای توانایی اتلاف انرژی خوب، شکل‌پذیری قابل توجه و در عین حال مقاومت و سختی جانبی بالایی توصیف کردند. همچنین استفاده از تعداد ردیف‌های شیار بیشتر موجب تغییر مود شکست از کمانش خارج از صفحه‌ی لینک‌های خمشی به کمانش کلی دیوار فولادی و در نتیجه ظرفیت بالاتر مجموعه می‌شود. احمدی و همکاران [14] نیز در سال ۲۰۲۱ با بهینه‌سازی هندسه‌ی شیارهای قائم از ایجاد مفصل پلاستیک محلی جلوگیری نموده و باعث ایجاد مفاصل پلاستیک به طور همزمان در رابط‌ها شدند.

با بررسی پژوهش‌های مذکور، هدف اصلی در این پژوهش بررسی عددی اثر شکل و موقعیت شیارهای شیبدار بر مقاومت، سختی اولیه و استهلاک انرژی دیوار شیاردار می‌باشد. برای این منظور مدل های عددی با اســـتفاده از نرم‌افزار Abaqus تهیه می‌شود.

صحت‌سنجی

در ابتدای کار با هر نرم‌افزار محاسباتی برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و درستی نتایج آن می‌بایست خروجی‌های به دست آمده را با نتایج حاصل از پژوهش‌های تحلیلی و یا آزمایشگاهی موجود مقایسه کرد. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار آباکوس از دو پژوهش آزمایشگاهی که در ادامه معرفی می‌شوند، استفاده شده است. برای مدل‌سازی از نرم افزار Abaqus نسخه ٦/١٤ استفاده شده است. دیوار فولادی شیاردار توسط المان پوسته (S4R) مدل می‌شود. S4R یک المان عمومی چهار نقطه‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته است که هر نقطه دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی است. این المان قادر است کمانش خارج از صفحه را نیز مدل-سازی نماید. برای انتخاب اندازه مش در نرم‌افزار، مدل‌های مورد بررسی با اندازه‌های مش ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلیمتر مدل‌سازی و تحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌ها در مدل‌های با اندازه ۵، ۱۰ و ۱۵ میلیمتر مشابه یکدیگر

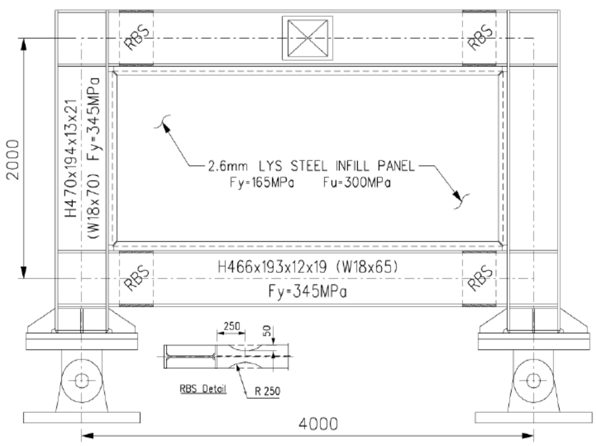
هستند. در نمونه‌های با اندازه‌ی مش ۲۰ و ۲۵ مقدار مقاومت نهایی نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی افزایش قابل توجهی داشته است. لذا با توجه به توضیحات داده شده و با توجه به افزایش زمان تحلیل با کوچکتر شدن اندازه مش، در این پژوهش از اندازه‌ی مش ۱۵ میلیمتر برای مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها استفاده شد.

صحت‌سنجی دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار

ابتدا نتایج مدلسازی عددی با نرم‌افزار Abaqus با نتایج پژوهش ویان و همکاران [14] که سال ۲۰۰۹ چاپ شده است، مقایسه می‌شود. از علل استفاده از این مقاله برای انجام کار صحت سنجی وجود سوراخ در ورق فولادی دیوار بر شی، در دسترس بودن اطلاعات نمونه آزمایش شده و اعتبار مقاله‌ی چاپ شده را می‌توان نام برد. جدول (۱) مشخصات مکانیکی مصالح، شکل (۱) مشخصات نمونه‌ی مورد آزمایش و شکل (۲) تصویر آن در حین آزمایش را نشان می‌دهند.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح بکار رفته در پژوهش ویان و همکاران [14]

	تنش جاری شدن (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	نسبت پواسون
ورق میانی	۱۶۵	۳۰۰	۰/۳
اعضای مرزی	۳۴۵	۵۲۰	۰/۳

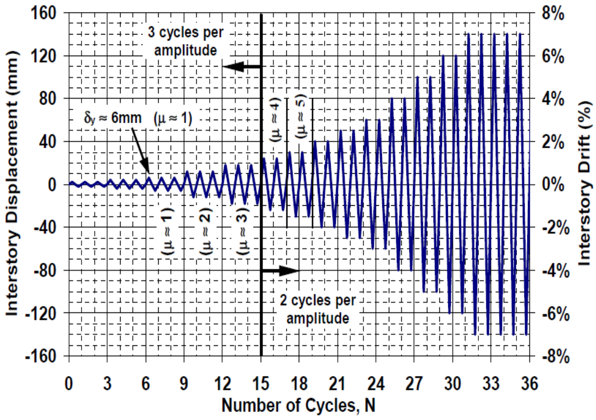


شکل ۱ مشخصات نمونه مورد آزمایش [14]



شکل ۲ تصویر نمونه قبل از انجام آزمایش [14]

بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیک مطابق شکل (۳) انجام شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تا جابجایی ۲۰ میلی‌متر در هر تغییرمکان ۳ سیکل و پس از آن ۲ سیکل برای هر مقدار جابجایی بارگذاری انجام شده است.

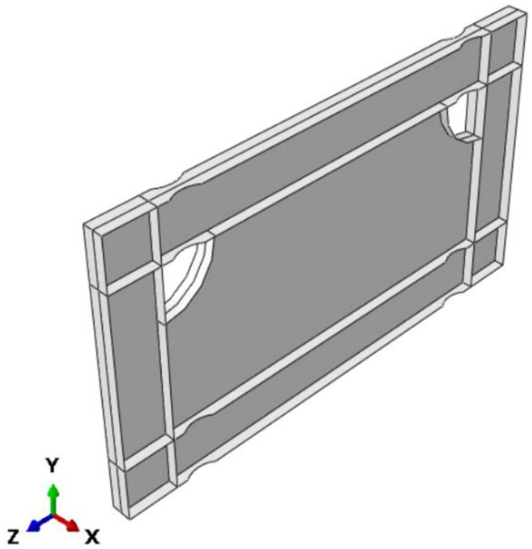


شکل ۳ تاریخچه جابجایی اعمالی در سیکل‌های بارگذاری [14]

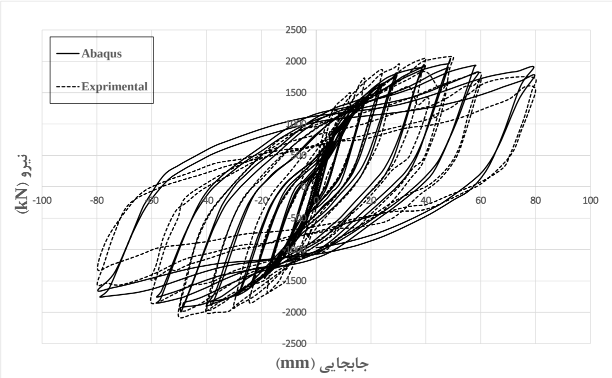
با دا شتن اطلاعات فوق از مقاله نام برده شده مدل سازی نرم‌افزاری در برنامه Abaqus انجام شد. با استفاده از المان Shell به صورت صفحه‌ای، ورق فولادی مدل شده و سوراخ‌ها با ابعاد مورد نظر در گوشه‌های آن ایجاد می‌شوند. تیرها با مقطع کاهش‌یافته مدل‌سازی شده و با سایر اعضا روی‌هم‌گذاری می‌شوند. بارگذاری مطابق الگوی شکل (۳) روی سازه یک‌طبقه یک‌دهانه اعمال شده و نتایج مورد نیاز به عنوان خروجی تعریف

می‌شوند. شکل (٤) مدل نرم‌افزاری ساخته شده را نشان می‌دهد.

پیش از انجام تحلیل رفت و برگشتی با انجام تحلیل کمانشی این مدل، نتایج حاصل ذخیره می‌شوند تا در مرحله اعمال بار چرخه‌ای فراخوانی شوند و مورد استفاده قرار گیرند. سپس تحلیل چرخه‌ای انجام می‌شود. در ادامه نتایج این مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. شکل (۵) منحنی‌های چرخه‌ای دو حالت را نشان می‌دهد. از مقایسه دو نمودار در می‌یابیم که نتایج مدل‌سازی عددی انطباق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش دارند؛ به طوری که اختلاف برش پایه بیشینه بین دو حالت مذکور در حدود ۲ درصد می‌باشد.



شکل ٤ مدل نرم‌افزاری نمونه مورد آزمایش

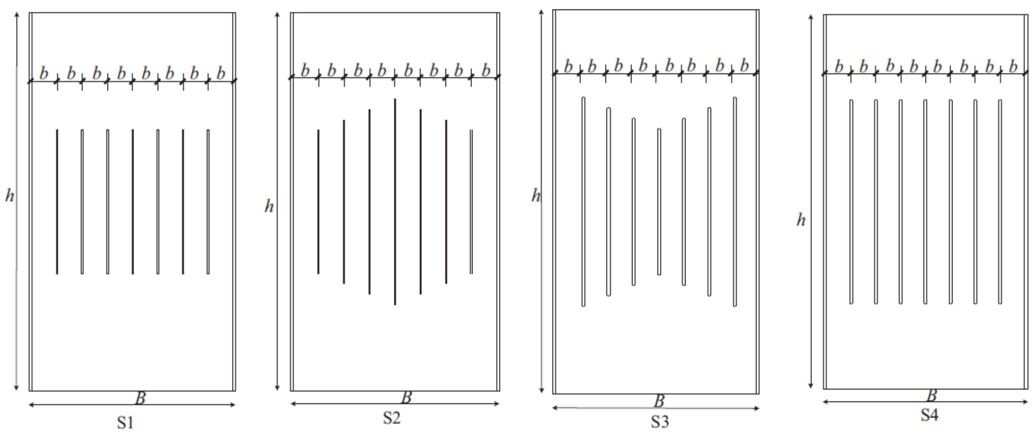


شکل ۵ مقایسه منحنی چرخه‌ای به دست آمده از مدل‌سازی عددی و کار آزمایشگاهی ویان و همکاران [14]

صحت‌سنجی دیوار برشی فولادی شیاردار

دیگر پژوهش مورد استفاده برای صحت‌سنجی مقاله‌ی لو و همکاران [12] است که در بخش قبل به آن اشاره شد. این دیوار فولادی شامل یک ورق فولادی و دو سخت‌کننده انتهایی است. این محققین بنابر نتایج به دست آمده، دیوار برشی شیاردار با شیارهای با طول نامساوی را در مقایسه با دیوارهای شیاردار معمولی دارای توانایی اتلاف انرژی خوب، شکل‌پذیری قابل توجه و در عین حال مقاومت و سختی جانبی بالا توصیف کردند. شکل (٦) نمایی از ٤ نمونه‌ی مورد بررسی آن‌ها را نشان می‌دهد که در این پژوهش، نمونه‌ی S4 برای صحت‌سنجی انتخاب شده است.

شکل (۷) نمونه آزمایشگاهی این پژوهش را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که دیوار برشی فولادی در راستای خارج از صفحه مقید شده و به بیان دیگر مهار جانبی دارد.



شکل ٦ چهار نمونه‌ی مورد بررسی با چیدمان متفاوت شیارها در پژوهش لو و همکاران [12]



شکل ۷ نمونه آزمایشگاهی بررسی شده [12]

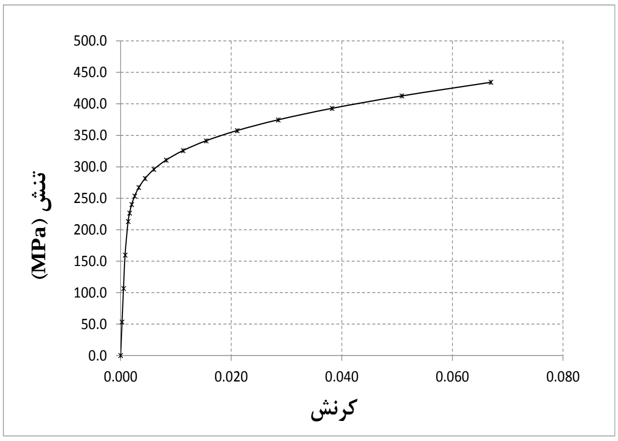
لازم به توضیح است به علت آنکه دیوار برشی فولادی در تغییرمکان‌های کوچکی جاری می‌شود، برای تحلیل از روش کنترل تغییرمکان (و نه کنترل بار) استفاده شده است. برای بارگذاری از یک جک با ظرفیت ۱۰۰۰ kN استفاده شده است. ضمناً مشابه صحت‌سنجی نخست، برای مدل‌سازی کمانش در دیوار فولادی ابتدا نقص اولیه با انجام تحلیل کمانشی اعمال می‌شود. عرض شیارها ٤ mm و عرض نوارها ٦٩ mm در نظر گرفته شده‌اند. مصالح مورد استفاده در این پژوهش فولاد با مقاومت تسلیم ٢٦٦ MPa، ضریب پواسون ۰/۳ و مدول الاستیسیته MPa ۱۰۵×۲/۰۶ می‌باشد. برای اعمال منحنی تنش-کرنش و مشخصات پلاستیک فولاد مصرفی در نرم‌افزار از رابطه‌ی (۱) (رابطه‌ی رامبرگ-اسگود) استفاده می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002\left(\frac{\sigma}{F_y}\right)^n \qquad (۱)$$

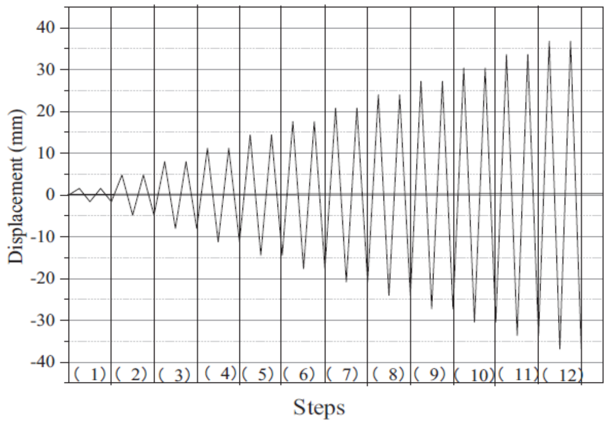
در رابطه (۱) ε نشان‌دهنده‌ی کرنش، σ تنش، E مدول الاستیسیته و F_y تنش تسلیم می‌باشند. شکل (۸) منحنی تنش-کرنش به دست آمده را نشان می‌دهد.

در این آزمایش برای بارگذاری از الگوی بار شکل (۹) استفاده شده است.

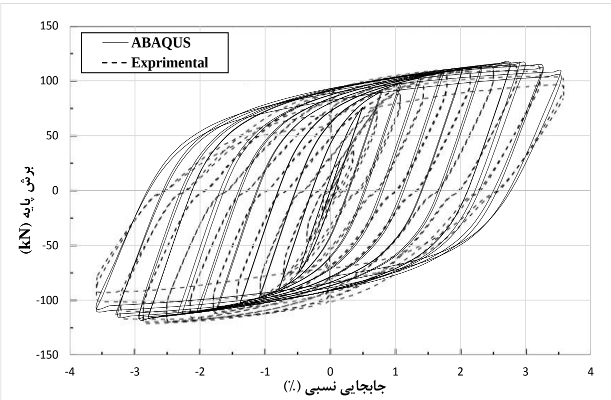
شکل (۱۰) مقایسه منحنی چرخه‌ای استخراج شده از مدل‌سازی با نتایج حاصل از آزمایش پژوهش لو و همکاران [12] را نمایش می‌دهد. اختلاف برش پایه در دو حالت آزمایشگاهی و عددی در حدود ۳ درصد می‌باشد. این مقایسه نشان‌دهنده‌ی تطابق خوب نتایج و صحت مدل‌سازی است. بنابراین با توجه به دو مدل‌سازی صورت گرفته و تطابق خوب نتایج حاصل از تحلیل رفت و برگشتی با روش اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی درج شده در پژوهش‌های مذکور، صحت مدل‌سازی تأیید می‌شود و در ادامه مدل‌های عددی دیگری با اطمینان از نتایج ایجاد می‌شوند.



شکل ۸ منحنی تنش-کرنش فولاد مصرفی



شکل ۹ بارگذاری چرخه‌ای اعمالی [12]



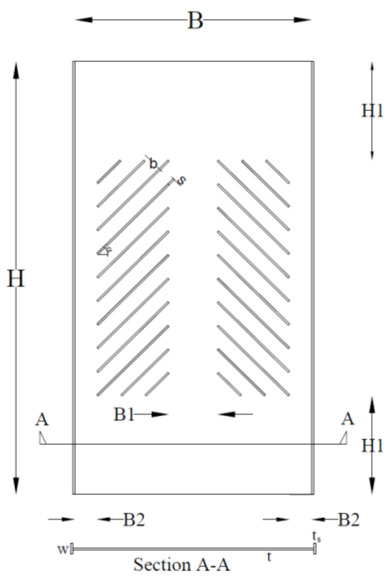
شکل ۱۰ مقایسه منحنی چرخه‌ای به دست آمده از پژوهش عددی به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی و کار آزمایشگاهی لو و همکاران [12]

ایده استفاده از شیار مایل در دیوار برشی فولادی

به طور کلی هدف از این پژوهش مطالعه عددی اثر بکارگیری شیارهای مایل (شیبدار) در دیوار برشی فولادی می‌باشد. ایده‌ی استفاده از شیار مایل با زاویه‌ی ۴۵ درجه در دیوار برشی فولادی پیش‌تر در پژوهش‌های دیگری از جمله دو مقاله‌ی جین و همکاران [1] و وانگ و همکاران [11] مطرح شده است. با توجه به مطالعات انجام شده توسط وانگ و همکاران [11] استفاده از شیارهای مایل نسبت به قائم سبب گستردگی بیشتر سطح تسلیم، استفاده از حداکثر ظرفیت ورق و اتلاف بیشتر انرژی ورودی به واسطه‌ی عمل کردن المان‌های خرپایی در کشش و فشار می‌شود. این موضوع (ایجاد سطح تسلیم و مفصل پلاستیک) در المان‌های خمشی مورد نظر در دیوار برشی فولادی با شیارهای عمودی، عموماً در دو سمت نوار رخ می‌دهد.

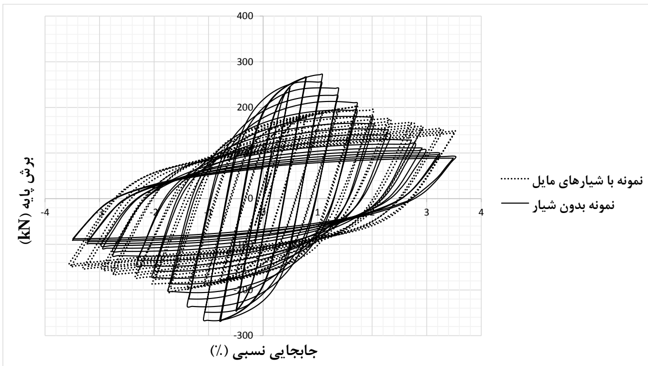
دو نمونه مذکور از دیوار برشی فولادی شیاردار با شیارهای مایل به علت استفاده از ورق فولادی دوگانه و یا صفحه بتنی از منظر ساخت دشوار و پرهزینه به نظر می‌رسند. بنابراین ارائه یک مدل ساده و عاری از پیچیدگی‌ها که هم قادر به تأمین سختی و مقاومت مورد نیاز باشد، هم شکل‌پذیری قابل قبول و توانایی استهلاک انرژی خوبی داشته باشد و هم از لحاظ اجرایی مورد پذیرش جامعه‌ی مهندسی باشد، می‌تواند ارزیابی جامعی برای الگوی پیشنهادی در اختیار قرار دهد.

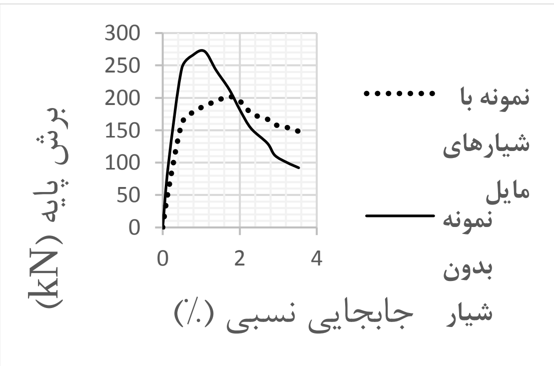
دیوار فولادی مورد بررسی مطابق شکل (۱۱) دارای دو ردیف شیار مایل با فواصل یکسان می‌باشد. این نوع دیوار برشی شیاردار یادآور مهاربندهای هشتی به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی می‌باشد. در راستای ارزیابی عملکرد این نوع دیوار برشی فولادی، با اطمینان از صحت نتایج نرم‌افزار بر مبنای صحت‌سنجی‌های صورت پذیرفته، مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus انجام می‌شود.



شکل ۱۱ تصویر دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار پیشنهادی

برای توضیح بهتر نحوه عملکرد شیار شیبدار در دیوار برشی فولادی شکل (۱۲) مقایسه‌ای از منحنی چرخه‌ای و پوش دیوار فولادی بدون شیار و دیوار دارای شیارهای شیبدار تحت بار چرخه‌ای ارائه می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به کاهش مساحت فولاد مصرفی مقاومت نهایی و سختی اولیه دیوار در نمونه‌ی شیاردار پایین‌تر از نمونه‌ی بدون شیار است. اما با بالا رفتن تغییرمکان نسبی افت مقاومت شدیدی در دیوار فولادی بدون شیار رخ داده که همین موضوع سبب افت پارامترهای لرزه-ای آن می‌شود. دلیل این پدیده اعمال نیروی بیشتر از سوی ورق فولادی به سخت‌کننده‌های انتهایی و کمانش آن‌ها و رفتار تردتر در نمونه‌ی بدون شیار می‌باشد.





شکل ۱۲ مقایسه نمودار چرخه‌ای و پوش دیوار فولادی بدون شیار و دیوار فولادی با شیارهای شیبدار

مدل‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر شکل و موقعیت قرارگیری شیارها در دیوار برشی فولادی شیاردار مقادیر ابعادی B1/B، B2/B، H1/H، عرض شیار، عرض نوار و مقطع سخت‌کننده انتهایی به عنوان متغیرهای پیکربندی انتخاب می‌شوند. ابعاد ورق فولادی و مشخصات فولاد مصرفی برای مقایسه نهایی با مدل‌های لو و همکاران [12] برابر با ۸ ×۵۵۰×۱۰۱۰ میلیمتر در نظر گرفته می-شوند. متغیر β (نسبتی از ارتفاع دیوار که از شیار تشکیل‌شده است، (β=ml/h و b/t برای رفتار شکل‌پذیر دیوار بایستی موردتوجه قرار گیرد. مقدار بهینه β بین ۰/۶۵ و ۰/۸۵ است. به عبارت‌دیگر بین ۶۵ تا ۸۵ درصد ارتفاع دیوار بایستی از رابط‌ها و مابقی از ناحیه اتصالی تشکیل شده باشد. مقدار بهینه این پارامتر بر اساس نتایج آزمایش استخراج شده‌است [9]. این متغیر برای نمونه‌ی پایه برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. متغیر بعدی نسبت عرض رابط به ضخامت آن است. این نسبت برای جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه کنترل می‌شود. اگر رابط خیلی نازک باشد، مشکل ناپایداری ایجاد می‌شود. در اینجا با توجه به اندازه ورق فولادی برای مدل پایه عرض نوار ۵۰ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا پیکربندی دیوار فولادی مورد نظر بر مبنای فرضیاتی اولیه جهت مدل نمونه پایه (نمونه شماره ۱) انجام می‌شود. برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر، در هنگام تغییر یک پارامتر سایرین ثابت فرض می‌شوند. در ادامه ۱۵ مدل که جزئیات آن‌ها در جدول (۲) درج شده است، بررسی می‌شوند.

همانطور که در جدول (۲) مشـــاهده می‌شـــود در این ۱۵ مدل ٦ پارامتر مذکور به ترتیب دچار تغییرات شـــده تا اثر آن روی رفتار چرخه‌ای دیوار فولادی بررسی شوند. لازم به توضیح است ۵ پارامتر اول نشان‌دهنده وضعیت قرارگیری شیارها و به طور کلی پیکربندی ورق فولادی و مورد آخر ســخت‌کننده‌های انتهایی هستند. برای بارگذاری از الگوی بار شکل (۸) استفاده می‌شود. در ادامه نتایج تحلیل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

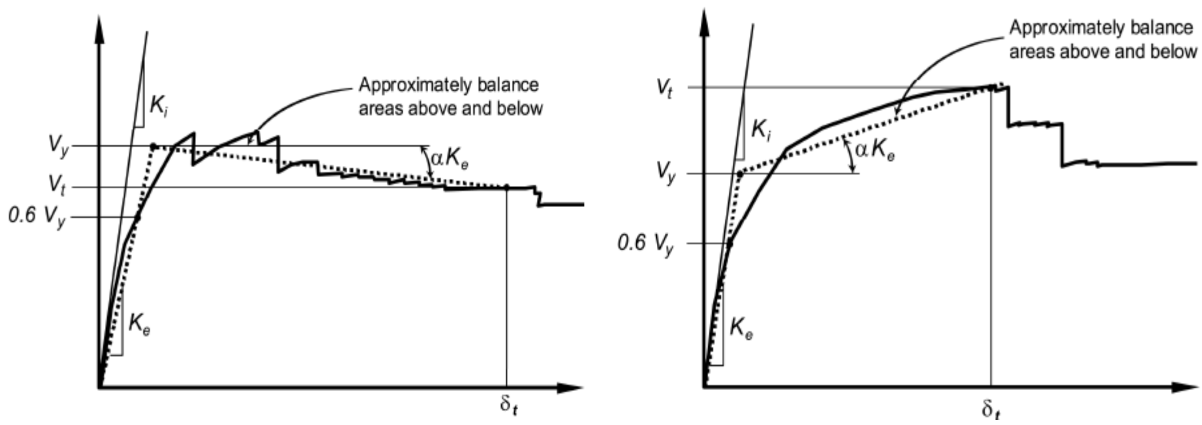
جدول ۲ جزئیات نمونه‌های مدل‌سازی شده

شماره	متغیر	مدل	B1/B	B1	B2/B	B2	H1/H	H1	عرض نوار	عرض شیار	مقطع سخت کننده
۱	عرض	1-Base	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	I
۲		2-Width-165	۰/۳۰	۱۶۵	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	I
۳		3-Width-55	۰/۱۰	۵۵	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	I
۴		4-Side-27.5	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۵	۲۷/۵	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	I
۵		5-Side-82.5	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۱۵	۸۲/۵	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	I
۶	ارتفاع	6-Heigth-101	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۰	۱۰۱	۵۰	۱۰	I
۷		7-Heigth-151.5	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۵	۱۵۱/۵	۵۰	۱۰	I
۸	نوار	8-Strip-35	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۳۵	۱۰	I
۹		9-Strip-65	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۶۵	۱۰	I
۱۰	شیار	10-Slit-12.5	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۲/۵	I
۱۱		11-Slit-7.5	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۷/۵	I
۱۲	مقطع سخت کننده	12-Box-50	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	Box50
۱۳		13-Box-100	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	Box100
۱۴		14-UNP-50	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	UNP50
۱۵		15-UNP-100	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۰۹	۵۰	۰/۱۳	۱۳۰	۵۰	۱۰	UNP100

مقایسه نتایج تحلیل

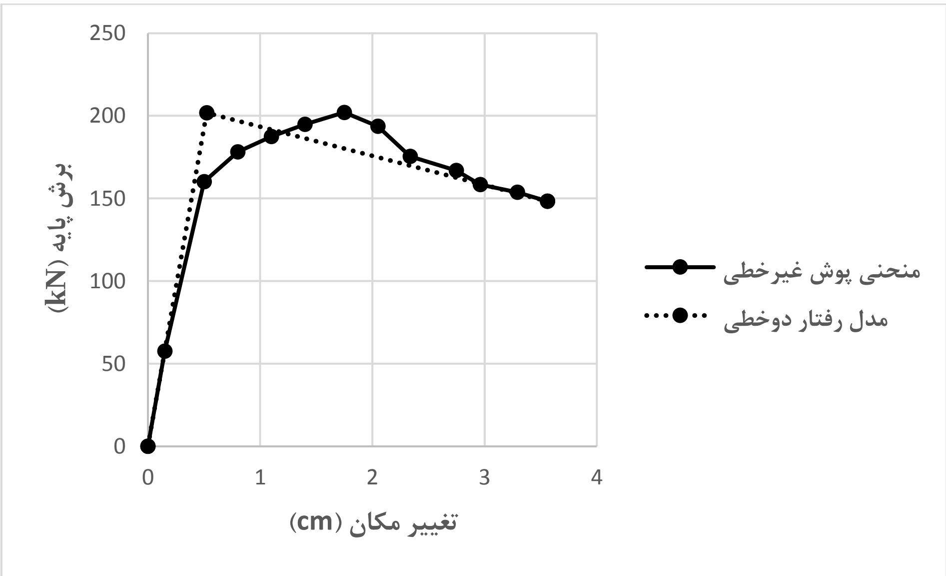
در این بخش شاخص‌های با اهمیت از منظر رفتار چرخه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. سختی، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و انرژی تلف شده برای مدل‌ها اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور لازم است تا منحنی‌های دوخطی ایده‌آل سازه‌ها از روی نمودار پوش تهیه شود. این کار با استفاده از دستورالعمل FEMA356 [16] انجام شده است. در مدل ساده شده باید دقت شود که Vy بزرگتر از بیشینه برش پایه در منحنی رفتار غیرخطی نشود. منحنی دوخطی با سعی و خطا چنان ترسیم می‌شود که سطح زیر مدل رفتار دوخطی با سطح زیر منحنی رفتار غیرخطی تا تغییرمکان هدف برابر شود. شکل (۱۳) جزئیات مدل ایده‌آل دوخطی را نمایش می‌دهد.

در ادا مه برای نمو نه منحنی دوخطی ا یده‌آل برای مدل شماره ۱ (Base) در شکل (۱٤) ترسیم شده است.



الف ب

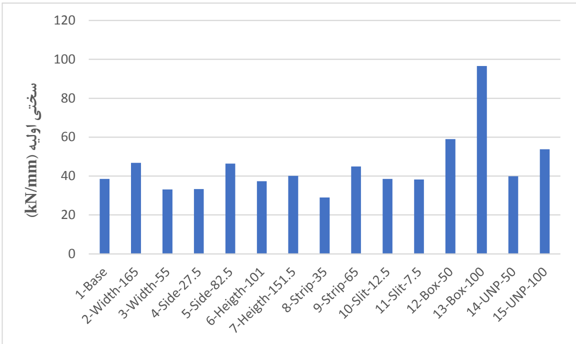
شکل ۱۳ منحنی ساده شده‌ی نیرو-تغییرمکان سازه برای دو حالت الف) با شیب مثبت و ب) شیب منفی [16]



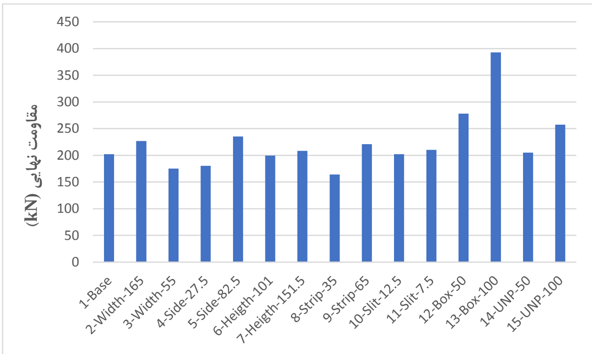
شکل ۱٤ منحنی ساده شده‌ی نیرو-تغییرمکان برای مدل شماره ۱

سختی اولیه

این پارامتر که بیانگر شیب ابتدایی منحنی پوش سازه است برای ۱۵ نمونه‌ی مدل‌سازی شده در شکل (١٥) نمایش داده شده است. با دقت در این نمودار می‌توان دریافت که مقدار سختی اولیه دیوار با بالا رفتن مساحت شیار مطابق انتظار کاهش می‌یابد. همچنین واضح است با بکارگیری سخت‌کننده انتهایی با ممان اینرسی بالاتر، سختی اولیه به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال سختی اولیه در نمونه ۱۲ با استفاده از مقطع BOX50 در حدود ۵۳ درصد بالاتر از سختی اولیه نمونه معیار می‌باشد. تغییر در عرض شیارها در نمونه‌های ۱۰ و ۱۱ تغییر چندانی در سختی دیوار فولادی ایجاد نمی‌کند. این مقایسه همچنین نشان می‌دهد تغییر در وضعیت شیارها یک راه مؤثر در تغییر و تنظیم سختی اولیه دیوار برشی می‌باشد.



شکل ١٥ سختی اولیه نمونه‌ها



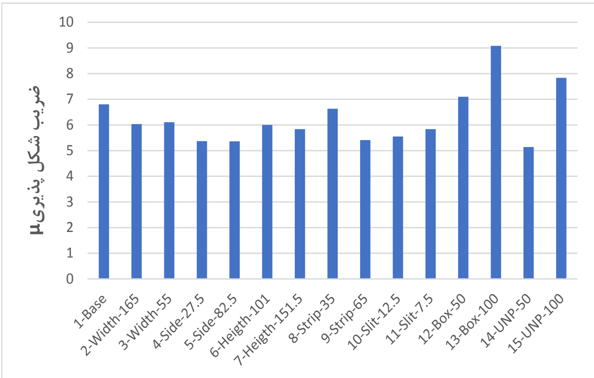
شکل ١٦ مقاومت نهایی نمونه‌ها

مقاومت نهایی

این پارامتر بیانگر بیشترین برش پایه تحمل شده توسط سازه در هنگام بارگذاری می‌باشد. شکل (١٦) نمونه‌ها را از این جهت مقایسه می‌کند. مطابق این نمودار مشاهده می‌شود که افزایش سطح شیار به علت کاهش سطح مصالح دیوار موجب کاهش مقاومت نهایی آن می شود. مشابه سختی اولیه در نمونه‌های ١١ و ١٢ تغییر ٢٥ درصدی عرض شیارها تغییر چندانی در مقاومت نهایی نمونه‌ها نداشته است.

شکل‌پذیری

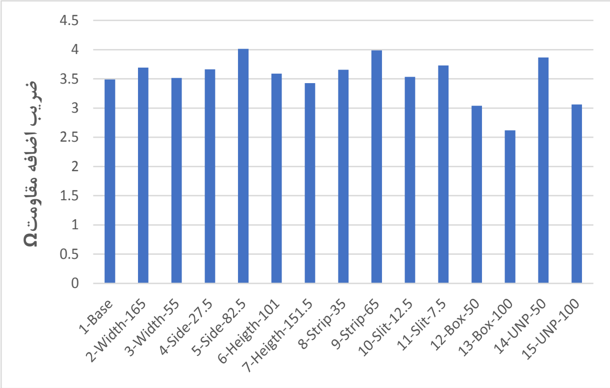
این پارامتر که بیانگر نسبت کرنش نهایی به کرنش جاری شدن می‌باشد، با استفاده از نمودار پوش دوخطی در نمونه‌ها به دست می‌آید. با توجه به شکل (١٧) برخی نمونه‌ها از جمله نمونه معیار توانسته‌اند ضریب شکل‌پذیری در محدوده عدد ۷ را کسب نمایند و نمونه‌ها با سخت‌کننده انتهایی صلب‌تر شکل‌پذیری بالاتری دارند. در بین نمونه‌های با سخت‌کننده انتهایی ساده، نمونه معیار بیشترین ضریب شکل‌پذیری را داراست.



شکل ١٧ شکل‌پذیری نمونه‌ها

اضافه مقاومت

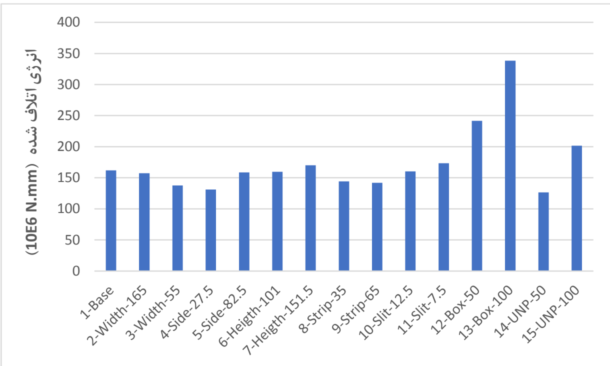
ضریب اضافه مقاومت به عنوان دیگر پارامتر مهم در رفتار چرخه-ای دیوار برشی فولادی در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ضریب نشان‌دهنده‌ی مقاومت ذخیره‌ای است که بین تراز تسلیم کلی سازه و تراز اولین تسلیم (نقطه‌ای که منحنی دوخطی ایده‌آل از منحنی غیرخطی جدا می‌شود) وجود دارد. از این رو این ضریب عبارت است از خارج قسمت نیروی متناظر با حد تسلیم کلی سازه به نیروی متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک [16]. کاهش سطح شیارها در نمونه‌های ۵ و ۹ نسبت به نمونه معیار (نمونه ۱) موجب افزایش ۱۵ درصدی ضریب اضافه مقاومت در این نمونه‌ها شده است. بکارگیری سخت‌کننده‌ها با صلبیت بیشتر نیز باعث کاهش ضریب اضافه مقاومت نمونه‌ها شده است.



شکل ۱۸ ضریب اضافه مقاومت در نمونه‌ها

انرژی اتلاف شده

این پارامتر که معرف سطح زیر منحنی چرخه‌ای دیوار برشی فولادی است، برای نمونه‌های مورد بررسی در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار کاهش فاصله میانی شیارهای چپ و راست با یکدیگر (B1) از ۱۰۰ به ۵۵ میلیمتر موجب کاهش ۱۵ درصدی و کاهش فاصله شیارها با انتهای دیوار (B2) از ۵۵ به ۲۷,۵ موجب کاهش ۱۹ درصدی انرژی اتلاف شده، گردیده است. با توجه به اینکه افت مقاومت در چرخه‌های متوالی در نمونه‌های مذکور تقریباً ثابت بوده است، کاهش انرژی اتلاف شده به سبب کاهش مقاومت نهایی در اثر رشد مساحت شیارها در نمونه و در نتیجه کاهش سطح زیر منحنی چرخه‌ای رخ داده است. ضمن آنکه بکارگیری مقطع BOX برای سخت‌کننده‌ی انتهایی افزایش چشمگیر انرژی اتلاف شده را به همراه داشته است که این موضوع با توجه به رشد چرخه‌ها در منحنی رفت و برگشتی قابل پیش‌بینی بود. همچنین اندازه ۵۰ میلیمتری انتخاب شده برای عرض نوارها بهترین عملکرد را از جهت انرژی اتلاف شده داشته است.



شکل ۱۹ انرژی اتلاف شده در نمونه‌ها

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش معرفی و پیشنهاد دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار با ساختار ساده‌تر نسبت به مدل‌های پیشین است. علت استفاده از شیارهای شیبدار نسبت به قائم، گستردگی بیشتر سطح تسلیم، استفاده از حداکثر ظرفیت ورق و اتلاف بیشتر انرژی ورودی به وا سطه‌ی عمل کردن المان‌های خرپایی در کشش و فشار می‌باشد [11]. این موضوع (ایجاد سطح تسلیم و مفصل پلاستیک) در المان‌های خمشی مورد نظر در دیوار برشی فولادی با شیارهای عمودی، عموماً در دو سمت نوار رخ می‌دهد.

ایده‌ی استفاده از شیار مایل در دیوار برشی فولادی پیش‌تر در پژوهش‌های دیگری از جمله دو پژوهش جین و همکاران [1] و وانگ و همکاران [11] مطرح شده است. دیوار فولادی شیاردار پیشنهادی با توجه به حذف یکی از دو ورق در مقایسه با پژوهش [11] و همچنین عدم استفاده از مهارهای جانبی بتنی در مقایسه با پژوهش [1] دارای ساختار ساده‌تر نسبت به دو نمونه مذکور برآورد می‌شود. پس از بررسی دیوارهای برشی با شیارهای متفاوت، شیار هشتی با ایده گرفتن از مهاربند هشتی پیشنهاد شد و رفتار آن تحت بارهای رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفت.

مقایسه نتایج دیوار فولادی پیشنهادی با شیارهای شیبدار و دیوار فولادی بدون شیار با همان ابعاد نشان می‌دهد علی‌رغم کاهش مقاومت و سختی اولیه در نمونه شیاردار، این دیوار برشی از رفتار چرخه‌ای مناسب‌تری برخوردار است و توانایی استهلاک انرژی بیشتری دارد و خصوصاً در دریفت‌های بالای ۲ درصد عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. با علم به این موضوع پیکربندی دیوار فولادی شیاردار با تعریف ۵ پارامتر با اهمیت لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر این موارد می‌توان پارامترهای لرزه‌ای را به شکلی که مورد نظر است تغییر داد. نتایج نشان می‌دهند تنها با تغییر در محل قرارگیری شیارها در نمونه‌ها می‌توان مقاومت نهایی و سختی اولیه را به ترتیب تا ۱۹ و ۲۵ درصد تغییر داد. همچنین برای بالابردن میزان استهلاک انرژی استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی با ممان اینرسی بالاتر یکی از مؤثرترین راه‌هاست؛ به طوری که استفاده از مقطع Box100 به عنوان سخت‌کننده توانسته است استهلاک انرژی را نسبت به نمونه‌ی معیار بیش از ۲ برابر کند. از حیث شکل‌پذیری نمونه‌ی

معیار اعداد بالاتری را نسبت به نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی معمولی به خود اختصاص داده است. با توجه به نتایج تحلیل به طور کلی رفتار دیوار برشی با شکل شیار پیشنهادی در مقایسه با دیوار برشی فولادی بدون شیار بهبود یافته است. همچنین استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی می‌تواند سبب افزایش ظرفیت و قابلیت اتلاف انرژی گردد.

مراجع

1. Jin, S., Ou, J. and Richard Liew, J.Y., "Stability of buckling-restrained steel plate shear walls with inclined-slots: Theoretical analysis and design recommendations", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 117, pp. 13-23, (2016).
2. Muto, K., "Earthquake resistant design of 36-storied Kasumigaseki building", Muto Institute of Structural Mechanics, (1968).
3. Muto, K. N., Ohmori and Takahashi, T., "A study on reinforced concrete slitted shear walls for high-rise buildings", *5th World Conference on Earthquake Eng.,* Rome, Italy, (1973).
4. Martínez-Rueda, J.E. "On the evolution of energy dissipation devices for seismic design", *Earthquake Spectra,* Vol 18(2), pp. 309-346, (2002).
5. Hitaka, T. and Matsui, C. "Experimental study on steel shear wall with slits", *Journal of Structural Engineering*, Vol 129(5), pp. 586-595, (2003).
6. Cortes, G. "Steel slit panel frames for lateral resistance of buildings", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Purdue University, (2009).
7. Eatherton, M., Hajjar, J. G., Deierlein, H. Krawinkler, S., Billington and Ma, X. "Controlled rocking of steel-framed buildings with replaceable energy-dissipating fuses", *in Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering,* (2008).
8. Jacobsen, A., Hitaka, T. and Nakashima, M., "Online test of building frame with slit-wall dampers capable of condition assessment", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 66(11), pp. 1320-1329, (2010).
9. Khatamirad, M. and Shariatmadar, H., "Experimental and analytical study of steel slit shear wall. Steel and Composite Structures", Vol. 24(6), pp. 741-751, (2017).
10. Nazifi, A. and Shariatmadar, H. "Evaluation of the interaction of steel slit panel-frame", *Journal of structural and construction engineering,* Vol. 6(4), pp. 107-124, (2018).
11. Wang, P., Xue, Z. and Xiao, S., "Seismic behavior of Self-Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall made by two incline-slotted infill plates", *Journal of Constructional Steel Research,*. Vol. 133 pp. 47-64, (2017).
12. Lu, J., Yu, S., Xia, J., Qiao, X. and Tang, Y., "Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 147, pp. 477-487, (2018).
13. Lu, J., Yu, S,. Qiao, X. and Li, N., "Experimental Study on Low Cyclic Loading Tests of Steel Plate Shear Walls with Multilayer Slits", *International Journal of Steel Structures,* Vol. 18(4), pp. 1210-1218, (2018).
14. Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K. and Lin, Y., "Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams, I: Experimental investigation", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 135(3), pp. 211-220, (2009).

15. Ahmadi, Z., Aghakouchak, A. and Mirghaderi, S. R., "Steel slit shear walls with an efficient geometry", Thin-Walled structures, Vol. 159, (2021).

16. FEMA, BSS. "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", (2000).